

纤维增强技术在保温砂浆抗裂性能提升中的应用研究

丁志远 张成龙 许鹏程

上海宝冶集团有限公司 上海 200941

【摘要】：纤维增强技术在提高保温砂浆抗裂性能方面展现出显著优势，已成为建筑节能材料领域的重要发展方向。在保温砂浆中掺入不同类型的短切纤维，如聚丙烯纤维、玻璃纤维、玄武岩纤维等，能够显著提升其抗裂强度和变形能力，还能改善材料的微观结构，增强整体韧性与稳定性。纤维在砂浆中形成的三维分布结构，有助于分散内部应力、阻止裂缝扩展，提升材料的整体性能。本文围绕纤维增强机制、纤维类型选择、掺量与分布优化、界面粘结特性等关键因素进行深入研究，结合相关实验数据对增强效果进行量化分析，为后续工程应用提供可行的理论基础与技术路径。

【关键词】：纤维增强；保温砂浆；抗裂性能；增强机制；材料改性

DOI:10.12417/2811-0536.25.11.081

引言

抗裂性是衡量保温砂浆耐久性和整体稳定性的核心指标，直接关系到建筑围护结构的使用寿命与节能效果。传统保温砂浆由于干缩、温差应力及施工因素等影响，在长期服役过程中容易形成微裂缝，导致保温层失效，甚至诱发界面脱落与结构损伤。纤维增强技术掺入高性能纤维材料，改善砂浆的力学性能与微观结构，有效抑制裂缝的形成与扩展。本文以该技术在保温砂浆中的应用为研究对象，系统分析其增强机理与性能表现，为建筑节能材料的优化与推广应用提供技术支撑与理论依据。

1 保温砂浆常见裂缝问题与成因分析

保温砂浆作为现代建筑墙体保温系统中的重要组成部分，具有轻质、保温、施工便捷等特点，广泛应用于各类外墙保温工程中。在实际应用过程中，裂缝问题普遍存在，严重影响了其保温效果与结构安全性。这种材料在硬化过程中体积变化显著，尤其是由于干缩变形与温度收缩共同作用，使得应力集中于局部区域，进一步引发微裂缝的产生与扩展。加之其与基层或面层的界面粘结性能不足，裂缝更易沿界面处扩展。尤其在高温、低湿或急速干燥的施工环境下，砂浆内部水分迅速蒸发，水化反应受到抑制，导致早期干缩开裂现象极为明显。裂缝的出现影响建筑外观质量，更可能在热工性能上形成热桥效应，显著降低整体节能效果。这些裂缝还可能成为雨水渗透路径，诱发墙体内部受潮、霉变、碳化、钢筋锈蚀等一系列次生劣化问题，进而危及结构安全与耐久性。

从材料本身的物理与化学性质来看，保温砂浆通常由无机胶凝材料（如水泥、石灰）与轻质骨料（如膨胀珍珠岩、泡沫玻璃、聚苯颗粒等）按一定比例配

制而成。这类轻质骨料尽管具备优良的隔热性能，但其强度普遍较低、结构脆性大、吸水率高，使得砂浆在受潮或干燥过程中容易产生体积变化，诱发内部应力波动。若骨料分布不均或与胶凝材料之间的界面结合不牢固，就会在微观结构中形成应力集中点，成为裂缝的潜在起裂源，在外力、温度应变等作用下逐渐发展为宏观可见裂缝。施工环节中常见的问题，如配合比不合理导致水灰比偏高、搅拌不充分引发材料分离、施工厚度控制不一、基层未充分清理或润湿，均会造成砂浆性能不均，进而引发界面粘结失效、干缩差异和局部脱粘，显著加剧裂缝的产生和扩展风险，影响系统整体性能和耐久性。

在结构设计与施工工艺环节中，保温层与基层之间的变形协调性不足，是引发保温砂浆裂缝问题的又一关键因素。当外墙主体结构由于温度波动、湿度变化或荷载作用产生收缩、膨胀或位移时，若保温砂浆本身的柔性不足，或其变形能力与基层差异较大，就会在二者交界区域积聚大量剪切应力和拉应力。这种应力集中状态容易突破材料界面粘结强度，促使裂缝在界面或其附近区域起裂、扩展，最终形成剥离、开裂等结构性缺陷。由于保温砂浆通常处于建筑物的最外层，其长期承受风吹、日晒、雨淋、冻融等多重气候交替作用，导致热胀冷缩频繁发生，使其微观结构在反复应变中产生疲劳效应，加速材料老化和裂缝积累。特别是在昼夜温差大、年温变频繁的地区，这种问题更为突出。

2 纤维增强技术在建筑材料中的发展现状

纤维增强技术在建筑材料领域的应用已逐渐成为提升性能、延长使用寿命的重要途径。该技术在基体材料中引入短切或连续分布的纤维材料，以提高材料整体的力学性能与抗裂能力。在水泥基保温砂浆体系

中,纤维的掺入能够改善材料的抗拉强度和抗弯性能,还能在微观结构中形成网络支撑,分散内部应力,从而有效抑制裂缝的产生与扩展。过去十年中,伴随复合材料研究的深入,纤维增强建筑材料逐渐从传统钢筋网延伸至微观尺度的多种纤维种类,如聚丙烯纤维、聚乙烯醇(PVA)纤维、玄武岩纤维、玻璃纤维及碳纤维等。它们各具特点,在不同建筑场景中展现出差异化的增强效果,成为功能型建材发展的关键技术支撑。

聚合物纤维因其良好的分散性与韧性,已广泛应用于砂浆、混凝土等多种建筑材料中。聚丙烯纤维具备优异的耐碱性和抗紫外性能,可显著提高保温砂浆的抗裂性能及抗冲击能力;而PVA纤维因其良好的水化粘结能力,能够与水泥水化产物形成较强界面黏结,提高砂浆的整体致密性和韧性。无机类纤维,如玄武岩纤维和玻璃纤维,则在耐热性、抗老化性能方面表现优越,尤其适用于需要高耐久性的外墙保温系统。碳纤维虽然成本较高,但在强度与模量方面具有明显优势,适用于结构补强与高性能材料制备。纤维增强材料在建筑工业化和绿色建筑推广背景下,逐渐展现出不可替代的技术价值,并被广泛纳入保温砂浆抗裂改性体系中。

在实际工程应用中,纤维增强技术仅局限于材料本身的优化,更与施工工艺、分散技术和配合比设计密切相关。研究表明,合理控制纤维长度、直径与掺量,以及确保其在基体中的均匀分布,才可实现最佳的增强效果。目前,超细分散技术和表面改性处理在纤维工程中的应用逐步普及,显著提升了纤维与水泥基体的界面粘结力与耐久性。信息化建造技术的发展推动了对材料性能的数字化建模,使纤维增强建筑材料的设计更加精细化和可控化。未来,纤维增强技术将在保温系统、绿色节能建材、结构补强等方向持续拓展,成为建筑材料性能提升和功能升级的重要手段。

3 典型纤维材料在保温砂浆中的性能对比研究

典型纤维材料在保温砂浆中的应用效果受到纤维类型、物理性能及其与水泥基体的界面作用机制的综合影响。聚丙烯纤维因其良好的化学稳定性和极强的耐碱性,在水泥砂浆环境中不易发生降解,可有效提高材料的抗裂性和韧性。其细小的直径和柔软的结构使其能够在砂浆中形成三维乱向分布,阻碍裂缝的起裂与扩展。在抗冲击性能方面,聚丙烯纤维表现出良好的耗能能力,尤其适用于抗裂要求较高的外墙保温层系统。聚丙烯纤维与水泥水化产物之间界面相容性较强,能够在一定程度上提高砂浆的抗渗性能和体积

稳定性。

玻璃纤维作为一种无机增强材料,在提升保温砂浆的抗裂、抗压与抗剪性能方面具有显著优势。其高弹性模量有助于增强材料的整体结构刚度,但也对界面粘结性提出更高要求。未经耐碱处理的玻璃纤维在水泥强碱性环境中容易发生腐蚀,从而降低增强效果,因此在实际应用中常采用耐碱玻璃纤维进行改性处理,以增强其与基体之间的稳定性与耐久性。在温差变化剧烈的环境中,玻璃纤维掺量合理时能有效抑制砂浆的热胀冷缩变形,有助于提高材料在长期服役状态下的裂缝控制能力。其较高的拉伸强度与断裂延伸率使其在抑制微裂纹扩展方面具备出色性能。

玄武岩纤维作为近年来新兴的绿色环保材料,其化学组成稳定、耐酸碱性能优越,适用于多种复杂施工环境。在保温砂浆体系中,玄武岩纤维具有良好的分散性和力学增强效果,可显著提升材料的抗弯与抗冲击性能。其较高的热稳定性也使其适合在高温环境下使用,特别适用于南北温差显著地区的建筑外墙系统。研究表明,适量掺入玄武岩纤维的保温砂浆在干缩率、抗裂指数和耐候性能方面均优于未增强体系,不显著增加砂浆的整体密度,对保温效果影响较小。综合来看,不同纤维材料各有优势,在实际工程中应结合施工条件、使用环境及性能需求进行合理选择与配比,以实现保温与抗裂性能的协同优化。

4 纤维掺量与分布方式对抗裂效果的影响

纤维掺量是影响保温砂浆抗裂性能的关键参数之一,合理的掺量能够在不显著影响施工性能与密度的前提下,最大程度提升材料的整体抗裂能力。过低的纤维掺量难以在材料内部形成有效的增强网络,无法充分发挥其桥联和分散应力的作用,导致抗裂效果有限;而掺量过高则可能引起纤维团聚、降低砂浆流动性、增大空隙率,进而削弱力学性能。研究表明,在不同类型纤维中,最优掺量存在一定范围,聚丙烯纤维常在0.1%~0.3%质量分数之间取得良好增强效果。掺量对砂浆的早期干缩、抗裂指数及断裂韧性具有显著影响,其本质在于微观网络结构调控裂缝发展的路径与速度,降低应力集中程度。

纤维在砂浆中的分布方式对抗裂性能起着决定性作用,只有均匀分布才能构建有效的增强结构体系。当纤维分布不均,局部富集或空缺区域容易形成应力薄弱环节,成为裂缝发展的起点。在实际施工中,搅拌工艺、加料顺序和水灰比控制均对纤维分布产生影响。将纤维预先用水或减水剂分散处理后加入砂浆,

有助于提高分布均匀性,防止成团现象。纤维长度与直径也与其在砂浆中的分布状态密切相关,较短的纤维更容易分散但增强效果有限,过长则容易缠结团聚,阻碍均匀掺配。

实验研究显示,合理掺量与分布优化能显著提高保温砂浆的抗裂极限应变与断裂能,延缓微裂纹萌生时间并降低裂缝密度。显微分析可发现,均匀分布的纤维在裂缝端部与周围区域形成拉拔阻力,促使裂缝转向、分叉或终止,从而起到控制与阻断裂缝扩展的效果。不同类型纤维的界面粘结性能差异会进一步影响其分布稳定性与增强效果,因此在配合比设计中应综合考虑纤维与基体的界面相容性、材料工作性及纤维几何形态,以实现最优的抗裂性能表现。

5 纤维增强保温砂浆的工程应用效果分析

纤维增强保温砂浆在实际工程中的应用表明,其在抗裂、防渗、延长使用寿命等方面具备显著优势,能够有效改善传统保温系统在服役过程中存在的裂缝问题。在外墙外保温系统中,建筑物长期受温度梯度、湿度变化及风荷载影响,极易产生界面应力集中,从而引发脱落或裂缝现象。纤维增强砂浆在材料内部形成多维支撑结构,增强了其整体韧性和裂缝控制能力。工程实测数据表明,经纤维改性的保温砂浆层表面裂缝发生率明显降低,在高层建筑外立面和严寒地区节能改造项目中尤其表现出良好的稳定性与耐久性。其抗裂性能的提升直接减少了后期维修成本,提高了系统的整体安全性。

在多项工程案例中,纤维增强保温砂浆展现了优良的施工适应性和结构协同性。在实际施工过程中,对纤维长度、掺量与搅拌方式的优化调整,可兼顾材料的流动性与增强效果,使其在大面积涂抹和薄层施工中保持良好工作性能。以某沿海住宅群项目为例,

采用耐碱玻璃纤维增强砂浆后,外墙保温系统在高湿、高盐雾环境下使用三年以上未出现明显裂缝,墙体热工性能保持良好,表面无明显泛碱与渗水痕迹。在一处严寒气候区的装配式建筑试点中,掺入聚丙烯纤维的保温砂浆提升了抗冻性能,还有效控制了早期干缩裂缝的产生,为低碳节能型建筑提供了技术支撑。这些工程实例表明,纤维增强技术不仅是实验室验证的成果,还具备广泛且可复制的现场适用性。

长期性能分析与监测结果显示,纤维增强保温砂浆具有更优的耐候性和抗裂稳定性,其材料微结构在长期服役状态下能够维持较好的完整性。在温湿循环、冻融交替及紫外老化等复合环境作用下,传统保温砂浆容易出现微裂纹扩展及保温层剥离,而纤维增强材料则因其三维结构能有效缓冲与分散内部应力,提高系统抵抗环境侵蚀的能力。工程使用反馈还表明,该类材料在与保温板、界面层及饰面层的匹配性方面表现良好,未出现明显的界面滑移或层间剥落现象。随着绿色建筑与节能减排政策的持续推进,纤维增强保温砂浆将在更多公共建筑、住宅小区及市政工程中获得推广应用,其综合性能的提升将为建筑围护结构的耐久性与安全性提供更加可靠的材料保障。

6 结语

本文围绕纤维增强技术在保温砂浆抗裂性能提升中的应用,从裂缝问题成因、纤维材料性能对比、掺量与分布方式调控到实际工程应用效果,进行了系统研究和深入探讨。研究表明,不同类型纤维构建微观增强网络,能显著改善保温砂浆的抗裂、耐久及施工性能。结合工程案例分析可知,纤维增强保温砂浆具有良好的现场适应性和长期稳定性,是提升建筑围护系统质量的重要技术路径。未来,应继续推动该类复合材料的标准化与工程推广,为绿色建筑提供更加可靠的技术支撑。

参考文献:

- [1] 王强,刘志远.聚丙烯纤维增强砂浆的抗裂性能研究[J].建筑材料学报,2020,23(4):55-59.
- [2] 李伟,陈建华.玄武岩纤维在保温砂浆中的应用效果分析[J].建筑科学,2021,37(6):102-106.
- [3] 周宁,胡文涛.玻璃纤维增强水泥基材料耐久性研究[J].建筑结构,2022,42(3):71-75.
- [4] 韩磊,魏春生.外墙保温砂浆开裂原因及纤维增强控制技术[J].工程质量,2019,27(2):89-92.
- [5] 张浩,刘立新.不同纤维掺量对砂浆性能的影响试验研究[J].建筑节能,2023,51(1):63-67.